

Caracterización de mallas metálicas utilizadas en soldadura por resistencia para materiales compuestos de matriz termoplástica.

1. Introducción.

Los materiales compuestos de matriz polimérica están siendo objeto de gran interés en la industria, especialmente en aplicaciones aeronáuticas. Su baja densidad unida a su elevada resistencia permite una reducción de peso en las estructuras sin por ello renunciar a prestaciones mecánicas. Además, la posibilidad de elegir la orientación de las fibras de refuerzo en la dirección de las cargas a sufrir por la estructura permite optimizar su diseño, lo que se traduce en una mayor reducción de peso, factor clave en la industria aeronáutica.

Dos tipos de polímeros están siendo actualmente usados para la fabricación de las matrices de los materiales compuestos: termoestables y termoplásticos. Los polímeros termoestables tienen una estructura reticulada como resultado de una reacción de polimerización. Los polímeros termoplásticos tienen cadenas lineales unidas por enlaces débiles, los cuales pueden ser fácilmente rotos con la aplicación de calor. Actualmente, la mayoría de las aplicaciones de materiales compuestos de matriz polimérica utilizan polímeros termoestables. Sin embargo, hoy en día los materiales compuestos de matriz termoplástica están siendo objeto de gran interés debido a sus principales ventajas sobre los primeros, algunas de las cuales son mayor tenacidad, mayor resistencia al impacto y resistencia al ambiente (por su baja absorción de humedad, buena resistencia química y elevada resistencia a alta temperatura). Además, la posibilidad de ser reciclados y reprocesados los hace atractivos ecológicamente. Por último pero no menos importante, los cortos tiempos de procesado en comparación con los largos ciclos de polimerización requeridos para los compuestos basados en termoestables, la posibilidad de ensamblar paneles por soldadura y la posibilidad de almacenar el material a temperatura ambiente indefinidamente resultan en una significativa reducción de costes en la producción de los mismos. Las principales desventajas de los termoplásticos son sus elevadas temperaturas

y presiones de procesado, debido a sus relativamente elevadas temperaturas de transición vítrea y de fusión, y el elevado precio de la materia prima.

Las estructuras utilizadas en ingeniería, particularmente en la industria aeronáutica, son generalmente complejas y extensas, lo que significa que el ensamblado de piezas es un paso importante en el proceso de fabricación de las estructuras. Las técnicas de unión y ensamblado pueden generar irregularidades en la estructura, las cuales resultan en un debilitamiento de las propiedades mecánicas de la misma. Por esa razón es necesario dedicar una atención especial a la fabricación de las uniones. Las técnicas tradicionalmente usadas para unir paneles de materiales compuestos de matriz termoplástica son la unión mecánica y la unión adhesiva. Algunas de las posibles desventajas de los métodos mecánicos de unión son la concentración de tensiones que se introducen en el material, las delaminaciones provocadas durante el taladrado, la diferencia de coeficientes de expansión térmica entre remaches y material a unir, la corrosión galvánica y el incremento de la masa de la unión (debido al peso extra de los remaches). Por otro lado, los adhesivos requieren largos tiempos de curado y una minuciosa preparación superficial de los adherentes para obtener una cualidad aceptable en la unión.

Una de las razones detrás del creciente interés existente en los materiales compuestos de matriz termoplástica es la posibilidad de unir estructuras mediante soldadura. La soldadura se sirve de la capacidad de fluir de los termoplásticos cuando son calentados por encima de su temperatura de transición vítrea o de su temperatura de fusión (en el caso de polímeros amorfos o cristalinos respectivamente) y de recuperar sus propiedades iniciales una vez enfriados. La soldadura consiste básicamente en calentar la matriz en la intercara de la unión por encima de la temperatura de transición vítrea o de fusión según el polímero mientras se aplica una presión sobre las partes a unir. Esto se traduce en un mojado de las superficies debido al flujo de polímero, el que conlleva una interdifusión de las cadenas poliméricas de ambas partes a soldar. La unión es seguidamente consolidada durante el enfriamiento bajo la aplicación de presión. La soldadura evita los problemas relacionados con la concentración de tensiones originada

en los métodos mecánicos y los largos tiempos requeridos para realizar una unión adhesiva.

Las técnicas de soldadura pueden ser clasificadas en base al tipo de mecanismo de generación de calor en la intercara de la unión. En la soldadura térmica una fuente externa de energía aplica el calor directamente sobre las superficies a soldar. En la soldadura por fricción el calor es generado por fricción entre las superficies a soldar o por fricción intermolecular. Por último, la soldadura electromagnética se sirve de un campo eléctrico o magnético para calentar la intercara de la unión. Existe una gran cantidad de técnicas de soldadura disponibles para llevar a cabo uniones de materiales poliméricos termoplásticos, entre las cuales tres han destacado en la unión de materiales compuestos: soldadura por ultrasonidos, soldadura por inducción y soldadura por resistencia. El objeto de este estudio es la soldadura por resistencia por lo que se describe a continuación.

Soldadura por resistencia.

Como ha sido mencionado anteriormente, la soldadura por resistencia es una de las más prometedoras técnicas de unión para componentes fabricados con materiales compuestos termoplásticos. Esta técnica de soldadura utiliza una corriente eléctrica para calentar un implante resistivo, conocido como agente de calentamiento, situado entre los elementos a unir. Debido al efecto Joule, la temperatura en la intercara se eleva y el polímero circundante se funde dando lugar a la unión. Esta técnica requiere un equipo simple, cortos tiempos de proceso y escaso tratamiento superficial, lo que resulta en un muy bajo coste de proceso. Además, debido a que el agente de calentamiento permanece incrustado en la unión soldada, es posible reprocesar uniones incompletas (ver figura 1.1). De entre todos los factores que intervienen en el proceso de soldadura por resistencia de materiales compuestos poliméricos, tres de ellos son de especial interés en este estudio: el agente de calentamiento, el método de aplicación de la corriente y la presión de soldadura. A continuación se explican muy brevemente cada uno de ellos.

El agente de calentamiento. El agente de calentamiento es el alma del proceso de soldadura por resistencia. Proporciona el calor necesario para llevar a cabo la soldadura y permanece como parte de la unión, por lo que determina en gran medida la calidad de la misma. Por esta misma razón, la compatibilidad de ambos materiales (agente de calentamiento y material compuesto) es importante así como la resistencia a corrosión del mismo para asegurar un buen comportamiento frente al medioambiente. Los requisitos que debe reunir por tanto el agente de calentamiento son: conductividad eléctrica, compatibilidad material y resistencia a corrosión, sin olvidar que debe permitir el flujo del polímero a su través.

Dos tipos de agentes de calentamiento son utilizados en resistencia por soldadura, elementos consistentes en fibras de carbono y mallas metálicas. Las fibras de carbono tienen la ventaja de una alta compatibilidad con el material de los sustratos cuando de matriz polimérica reforzada con fibras de carbono se trata. Sin embargo, la calidad de las uniones es muy sensible a las conexiones eléctricas del agente de calentamiento y muestran una baja repetitividad. Alternativamente, las mallas metálicas, generalmente fabricadas de acero inoxidable debido a su alta resistencia a la corrosión, presentan una opción más fiable y generalmente facilitan las conexiones eléctricas en el proceso de soldadura. Las desventajas de utilizar insertos metálicos son que el implante actúa como un contaminante en la unión debido a su distinta naturaleza a la de las partes a soldar y el incremento de peso que supone. No obstante, las mallas metálicas pueden incrementar las propiedades mecánicas de la unión soldada y serán el objeto de este estudio.

Métodos para la aplicación de la corriente eléctrica. El perfil de corriente aplicado al agente de calentamiento durante el proceso de soldadura determina la evolución de la temperatura en la intercara. Básicamente el calor puede ser generado de dos formas distintas: aplicación de una corriente/voltaje/potencia constante durante un tiempo predeterminado, lo que resulta en un perfil creciente de temperatura hasta el principio del enfriamiento (momento en el que se desconecta la fuente de alimentación) o aplicación de una corriente/voltaje/potencia que se modifica gradualmente para conseguir una región constante de temperatura (ver figura 1.2).

La mayoría de los estudios sobre el proceso de soldadura por resistencia han sido llevados a cabo utilizando el primero de los métodos, el cual es más fácil de implementar debido a que no es necesaria una realimentación sobre la temperatura desarrollada en la intercara una vez definidos los parámetros del proceso. No obstante, el proceso de soldadura por resistencia a temperatura constante es el más adecuado para evitar sobrecalentamientos en la zona de unión. Esta forma de aplicación de la corriente eléctrica introduce un nuevo parámetro de proceso el cual es el tiempo de mantenimiento de la temperatura de proceso, el cual puede ser controlado para mejorar la calidad de las uniones. Más aún, es posible llevar a cabo un enfriamiento controlado, especialmente importante en la soldadura de laminados basados en polímeros termoplásticos semicristalinos debido a la dependencia del grado de cristalinidad con la velocidad de enfriamiento. Este método requiere información a tiempo real de la temperatura desarrollada en la intercara de soldadura y por lo tanto una realimentación de la información del proceso. Debido a la dificultad de realizar soldaduras a temperatura constante sólo hay disponible una escasa información sobre este tipo de proceso en la literatura.

Presión de soldadura. La presión de soldadura, también llamada presión de consolidación, es aquella aplicada a los substratos durante el proceso de soldadura. Esta presión tiene la función de asegurar un contacto adecuado entre las partes a unir. Deforma levemente los laminados promoviendo la difusión molecular a través del agente de calentamiento. La presión de soldadura facilita la expulsión de aire atrapada en la intercara de la unión. Esta presión se aplica al inicio del calentamiento siendo de especial importancia mantenerla durante la fase de consolidación para evitar delaminaciones en el material debido al flujo de polímero que tiene lugar en el proceso. Valores insuficientes de la presión de soldadura se traducen en aire atrapado en la intercara mientras que el someter a los laminados a sobrepresiones puede dar lugar a “uniones secas” debido al excesivo flujo de polímero que ocurre durante la consolidación.

Controlabilidad del proceso. La influencia de los parámetros de soldadura en la calidad de las uniones ha sido ampliamente investigada para distintos materiales y agentes de calentamiento. Sin embargo, la controlabilidad de la temperatura generada en la intercara de la soldadura durante el proceso no está suficientemente desarrollada. Dado que la temperatura es una magnitud que determina el estado físico de la matriz polimérica, sería de gran interés conocer la evolución de la temperatura en la intercara de la soldadura. Debido a que la velocidad de enfriamiento está directamente relacionada con la cristalinidad de los polímeros semicristalinos, el control de la misma sería también deseable. Con un completo control de la temperatura, sería posible evitar sobrecalentamientos en los laminados, asegurar que se alcanza la temperatura de proceso durante el calentamiento para prevenir uniones incompletas y programar distintos ciclos de temperatura dependiendo de la naturaleza de los materiales a soldar incluyendo procesos a temperatura constante. Además, una mejora en la controlabilidad de la temperatura resultaría en tiempos más cortos en la definición de los parámetros de soldadura, por ejemplo el valor de la potencia aplicada entre otros, para diferentes configuraciones de material, aislamiento y tamaño del agente de calentamiento.

Básicamente existen dos posibilidades para controlar el proceso, mediante medidas directas o por el contrario utilizando métodos indirectos. El método directo está basado en medir la temperatura desarrollada en la intercara, lo cual puede realizarse utilizando termopares. Algunas desventajas del empleo de termopares es que estos permanecen en la intercara de la unión una vez que el proceso finaliza convirtiéndose en un agente externo y consecuentemente influenciando las propiedades de la unión. Es clave además, un aislamiento que evite el contacto de los termopares con la corriente que atraviesa el agente de calentamiento para prevenir corrientes inducidas que puedan causar medidas incorrectas. Este aislamiento puede realizarse con película aislante resistente a alta temperatura, la cual se convierte en un agente externo adicional que permanece en la unión. Estos inconvenientes sugieren controlar el proceso mediante métodos indirectos: mediante modelización o realizando medidas indirectas de la temperatura.

El método indirecto propuesto en este trabajo está basado en la dependencia de la resistencia eléctrica de un elemento resistivo con la temperatura. La intención es por tanto, medir la resistencia eléctrica del agente de calentamiento para calcular su temperatura, para lo cual es necesario caracterizar las mallas metálicas empleadas como implante resistivo. En un conductor típico, la resistividad se incrementa proporcionalmente a la temperatura con una relación lineal. El factor de proporcionalidad es positivo en el caso de metales puros y aleaciones. Como primera aproximación por tanto, la evolución de la resistencia eléctrica con la temperatura en las mallas de acero inoxidable podría esperarse lineal.

Resumiendo, el principal objetivo de este trabajo es describir el perfil de temperatura desarrollado en la intercara de la unión durante el proceso de soldadura midiendo para ello la resistencia eléctrica del agente de calentamiento.

2. Procedimiento experimental.

Dos tipos de mallas metálicas con diferentes geometrías (denominadas M24 y M200) han sido el objeto de estudio en este trabajo. Ambas son de acero inoxidable AISI 304L. La malla M24 tiene un diámetro de hilo de 0.20mm y una apertura de 0.858mm mientras que la geometría de la malla M200 es 0.04mm y 0.09mm para el diámetro de hilo y apertura respectivamente (siendo la apertura la distancia libre entre dos hilos consecutivos de la malla, ver figura 2.1). Varios experimentos fueron llevados a cabo con el propósito de determinar la relación entre la resistencia y la temperatura de los citados implantes resistivos. Los experimentos realizados pueden dividirse en dos grandes grupos: experimentos con la malla desnuda al aire y experimentos con el equipo de soldadura. En el primer grupo de experimentos, las mallas fueron estudiadas sujetándolas “al aire” previniendo cualquier contacto del agente de calentamiento con factores externos con excepción del aire y de los cables utilizados para realizar las medidas. En el segundo tipo de experimentos se estudió la relación entre las dos mencionadas variables durante el

proceso de soldadura, utilizando para ello una malla metálica colocada entre dos paneles de material compuesto.

2.1. Materiales. Tres tipos de agentes de calentamiento fueron utilizados en los experimentos: malla M200 y malla M24 con 12 y 24 hilos longitudinales. Las mallas fueron cortadas con una longitud de 290mm y una anchura de 13, 12.7 y 25.4 respectivamente. Especial atención se puso en que los agentes de calentamiento de tipo M24 tuviesen el mismo número de hilos longitudinales en todas las muestras para disponer de mallas con la misma la resistencia eléctrica. Debido al pequeño tamaño de los hilos de la malla M200 no fue posible cortar muestras con un determinado número de hilos por lo que se trató de cortar los agentes de calentamiento con una anchura similar a la de la malla M24 con 12 hilos longitudinales.

Dos materiales compuestos de matriz termoplástica reforzados con fibra de vidrio fueron utilizados en este trabajo. Los polímeros fueron polieterimida y polisulfuro de fenileno. A partir de ahora se hará referencia a ambos materiales con GF/PEI y GF/PPS respectivamente. La polieterimida es un polímero termoplástico amorfo con una temperatura de transición vítrea de 215°C mientras que el polisulfuro de fenileno es un termoplástico semicristalino (con un grado de cristalinidad aproximado del 40%) con una temperatura de transición vítrea alrededor de 90°C y un punto de fusión de 285°C. A continuación se resume el proceso de fabricación de los laminados utilizados para la realización de este estudio. Se partió de ocho láminas de área 580x580mm² de tejido tipo satén de paso 8 preimpregnado con el polímero correspondiente con una secuencia de aplilamiento de $[0^\circ/90^\circ]_{4s}$. Las láminas de preimpregnado fueron colocadas entre dos platos de acero inoxidable tratado con agente antiadherente en una prensa calefactora. Los laminados se consolidaron a una temperatura de 320°C y una presión de 8bar y 20bar para GF/PEI y GF/PPS respectivamente. En ambos casos el enfriamiento se realizó con aire en vez de con agua para minimizar las tensiones térmicas que pudiesen originar alabeos en los laminados. El espesor final de los paneles fue de 2mm aproximadamente.

Para evitar una “unión seca” sin desproveer a los laminados de parte de la matriz polimérica, se colocaron en la intercara de la soldadura láminas de polímero adicionales. El espesor de resina aportado a la unión se calculó considerando la cantidad necesaria para rellenar los huecos entre los hilos del agente de calentamiento. Existen dos formas descritas en la literatura de referencia para realizar el aporte de resina a la unión: añadiendo láminas de polímero o impregnando el agente de calentamiento en resina previamente. En este trabajo se eligió el primero de los procedimientos con el propósito de tener acceso directo a la malla metálica y poder monitorizar su temperatura posicionando termopares en contacto con la misma, no en contacto con la resina de aporte y las partes a soldar (ver figura 2.6). No obstante, en algunos experimentos no se realizó un aporte de resina extra y en otros se utilizaron agentes de calentamiento preimpregnados con el polímero correspondiente.

2.2. Equipo de soldadura. El equipo utilizado para la realización de los experimentos consiste básicamente en una fuente de alimentación de corriente continua en la que es posible elegir una corriente constante, un sistema de aplicación de presión, un sistema de adquisición de datos y dos bloques de madera de alta densidad cubiertos con una lámina de poliimida y utilizados como aislantes térmicos (ver figura 2.7). El sistema de presión, compuesto por cuatro cilindros neumáticos, ofrece la posibilidad de controlar separadamente la presión de soldadura (aplicada a las partes a unir) y la presión aplicada a los conectores eléctricos.

De acuerdo con la ley de Ohm, para calcular la resistencia eléctrica del agente de calentamiento es necesario medir la corriente que pasa a su través y la diferencia de voltaje en extremos del mismo. Con este propósito, un amperímetro (compuesto por una resistencia auxiliar de valor conocido y un voltímetro en paralelo a esta, V_1) fue colocado en serie con el circuito eléctrico compuesto por la malla metálica y la fuente de alimentación. Asimismo, para medir el voltaje generado en los extremos del agente de calentamiento se utilizó otro voltímetro (V_2) colocado en paralelo.

El circuito eléctrico utilizado en los experimentos llevados a cabo con la malla metálica al aire se muestra en la Figura 2.2, donde la longitud considerada para medir el voltaje correspondiente al voltímetro V_2 se corresponde con la longitud de solape de la unión en los experimentos realizados con el agente de calentamiento situado entre las partes a soldar (192mm). Por otro lado, en los experimentos llevados a cabo con el equipo de soldadura, la corriente se aplica mediante conectores de cobre conectados a la fuente de alimentación como se muestra en la figura 2.9.

Las medidas de temperatura fueron llevadas a cabo utilizando tres termopares distribuidos a lo largo de la longitud monitorizada (correspondiente a la longitud de la unión soldada, 192mm). Para evitar cualquier efecto de borde, la región sensible de los termopares fue colocada a lo largo de la zona media de la anchura de la malla metálica. Con el propósito de evitar posibles medidas erróneas de la temperatura debido a la corriente fluyente a través del elemento resistivo, los termopares fueron aislados eléctricamente con película adhesiva resistente a alta temperatura. Los termopares fueron distribuidos suficientemente lejos de los bordes de la longitud de solape con el fin de evitar picos de temperatura causados por un calentamiento preferencial en los bordes de los laminados en los experimentos llevados a cabo con la malla metálica posicionada entre las partes a soldar. Para minimizar el impacto de los termopares en la intercara de soldadura, se procuró cortar el adhesivo utilizado para su aislamiento eléctrico lo más pequeño posible. Debido a que el adhesivo es resistente a alta temperatura, las áreas en contacto con este permanecen sin soldar ya que el polímero no puede atravesar dicha cinta adhesiva para cruzar la malla metálica (ver Figura 2.3). Los termopares y los voltímetros mencionados anteriormente fueron conectados a un sistema de adquisición de datos mencionado previamente.

3. Resultados y discusión.

La discusión de los resultados se basará en el estudio y comparación de los perfiles de resistencia eléctrica versus temperatura mostrados por las mallas metálicas durante sucesivos calentamientos.

Experimentos con la malla desnuda al aire. En esta sección se aplicaron distintos valores de corriente a las mallas metálicas con el objetivo de calentarlas hasta alcanzar una temperatura estable. Una vez estabilizada la temperatura, se tomaron medidas de la misma y de los voltajes mencionados anteriormente. A continuación se apagó la fuente de corriente con el objetivo de enfriar la malla metálica antes de aplicar el siguiente valor de corriente. Cada calentamiento proporcionó un punto experimental correspondiente a un valor de temperatura (promedio de las medidas de los tres termopares) y a un valor de resistencia eléctrica. Por cada ciclo de calentamientos se obtuvo una curva que representa la evolución de la resistencia eléctrica de la malla metálica con la temperatura.

En el caso de la malla M200 se aplicaron diez ciclos de calentamientos correspondientes a valores de corriente de 0,1A a 5A con un incremento de 0,5A. Para las mallas de tipo M24 se aplicaron cinco ciclos de calentamientos, en el caso del agente de calentamiento con 12 hilos longitudinales se utilizaron corrientes de 1A a 11,5A con un incremento de 0,5A mientras que en el caso de la malla M24 con 24 hilos longitudinales los valores de corriente fueron de 0,3A a 21A incrementándose en 1A. Los datos experimentales de los tres experimentos se presentan en las figuras 3.1, 3.2 y 3.3, los cuales se comentan a continuación.

Las mallas M200 y M24 con 12 hilos longitudinales muestran una relación lineal entre la resistencia eléctrica y la temperatura con un factor de proporcionalidad claramente mayor en el caso de la malla M200 (siendo la pendiente promediada de las curvas $11.43 \text{ E-}04 \text{ } \Omega/^{\circ}\text{C}$ y $4,66 \text{ E-}04 \text{ } \Omega/^{\circ}\text{C}$ para las mallas M200 y M24 respectivamente).

No se obtuvo una información fiable para describir el comportamiento eléctrico-térmico del agente de calentamiento de tipo M24 con 24 hilos longitudinales para bajas temperaturas. Sin embargo se puede apreciar una tendencia similar de la evolución de la resistencia con la temperatura de este tipo de malla para las dos muestras estudiadas (con 12 y 24 hilos respectivamente) a partir de 200°C (ver Figura 3.4).

Se encontraron problemas de precisión en las medidas de la resistencia eléctrica de las mallas metálicas. Bajos valores de corriente dieron lugar a una gran dispersión en los datos. Los valores de resistencia medidos a temperatura ambiente fueron mayores que los valores obtenidos a mayores temperaturas. Se extrae de los resultados que para bajos valores de corriente la repetitividad de las medidas no es suficiente para estudiar la evolución de las dos variables de interés.

Debido a que la resistencia eléctrica de la malla M24 es menor que la que presenta la malla M200, es necesario emplear mayores valores de corriente para alcanzar la temperatura deseada por efecto Joule en el agente de calentamiento de tipo M24.

Experimentos con el equipo de soldadura. Este estudio está focalizado en describir el comportamiento del agente de calentamiento durante el proceso de soldadura por resistencia para utilizar este conocimiento en el control de dicho proceso. Dado que la soldadura por resistencia es un proceso orientado a unir dos partes, el comportamiento de las mallas metálicas durante el primer calentamiento, en el cual se produce la unión, es el de mayor interés. Consecuentemente, la mayoría de la discusión estará centrada en la evolución de la resistencia con la temperatura originada en el primer calentamiento de cada muestra. No obstante, la información acerca de la evolución eléctrico-térmica de las mallas durante los subsiguientes calentamientos es también interesante para entender el comportamiento durante el primer calentamiento. Además, esa información podría ser útil a la hora de reprocesar uniones.

Los resultados de los experimentos llevados a cabo con las mallas M200 y M24 situadas entre laminados se comentan a continuación. Estos experimentos, en los que el tipo de agente de calentamiento y material de los sustratos se combinan, serán la referencia para describir la evolución de la resistencia con la temperatura en la intercara de soldadura. El orden en el cual los calentamientos fueron aplicados a las mallas metálicas fue de gran relevancia. Para enfatizar este hecho en la mayoría de las gráficas de este apartado las curvas correspondientes al primer y subsiguientes calentamientos de cada muestra se presentan en rojo y azul respectivamente. A continuación se comentan

los resultados obtenidos en los tests 001- 004 (ver figuras 3.6, 3.7, 3.8 y 3.9) en los cuales tres muestras (cada una consistente en un agente de calentamiento y dos partes a unir) se ensayaron.

El comportamiento del elemento resistivo durante el primer calentamiento difiere del observado en los subsiguientes calentamientos en ambos tipos de mallas metálicas. Los subsiguientes calentamientos muestran una relación lineal entre la resistencia eléctrica y la temperatura en ambas mallas.

La malla M24 muestra un perfil de resistencia versus temperatura no lineal durante el primer calentamiento. Se observa una meseta en las curvas cercana a la temperatura de transición vítrea del polímero de los laminados. Además, en los experimentos llevados a cabo con laminados de GF/PPS aparece un punto de inflexión próximo al punto de fusión del polímero. La curva correspondiente al primer calentamiento se solapa razonablemente bien con las curvas generadas en los subsiguientes calentamientos después de la mencionada meseta en el caso de laminados de PEI y después del punto de inflexión en el caso de paneles de PPS.

El comportamiento de la malla M200 durante el primer calentamiento parece ser lineal cuando forma parte de la unión de laminados de PEI. Las curvas correspondientes al primer calentamiento encajan con los perfiles generados en los subsiguientes calentamientos a temperaturas mayores que en el caso de la malla M24. Este fenómeno puede estar relacionado con la geometría de la malla. La menor abertura de la malla M200 hace necesario alcanzar mayores temperaturas para disminuir la viscosidad del polímero con el objetivo de difundir la matriz polimérica a través del agente de calentamiento. Por el contrario, el mismo tipo de agente de calentamiento, malla M200, no muestra una clara evolución lineal de la resistencia eléctrica con la temperatura durante el primer calentamiento cuando los adherentes son de GF/PPS.

La primera de las conclusiones que se extrae de los experimentos es que el comportamiento térmico y eléctrico del agente de calentamiento está claramente

influenciado por la naturaleza del material de los adherentes, lo cual puede ser comprobado con los resultados arrojados por el experimento mostrado en la figura 3.14, en el que una malla de tipo M24 colocada entre dos laminados de PEI fue sometida a tres calentamientos. En este caso, para evitar el contacto entre el agente de calentamiento y los adherentes, dos láminas de película de Kapton se colocaron a ambos lados de la malla metálica, con lo que se impidió el flujo de polímero a través de la misma. Los perfiles de resistencia versus temperatura generados en la intercara durante los tres calentamientos siguieron la misma tendencia y mostraron una relación razonablemente lineal entre ambas variables.

La hipotética relación propuesta entre las mesetas observadas en las curvas durante los primeros calentamientos de la malla M24 y la temperatura de transición vítrea del polímero circundante, se comprueba en el experimento mostrado en la figura 3.15, en la que dos paneles de GF/PPS se soldaron utilizando láminas de PPS semicristalino en vez de amorfo a modo de aporte de resina extra. En el primer calentamiento no se observó ningún cambio en la pendiente que pudiera ser relacionado con la T_g del polímero.

Debido a que el comportamiento de la malla metálica durante el primer calentamiento muestra claras variaciones directamente relacionadas con la naturaleza y cambios del polímero circundante cuando del agente de calentamiento M24 se trata, se llevaron a cabo experimentos con ese tipo de agente de calentamiento realizando modificaciones sobre el mismo. Se estudió la evolución de la resistencia con la temperatura en la intercara de la soldadura en experimentos llevados a cabo con una malla de doble anchura (24 hilos), una malla aislada eléctricamente con pintura resistente a alta temperatura y una malla preimpregnada en polímero, cuyos resultados se comentan brevemente a continuación.

Los datos experimentales muestran que la anchura de la malla metálica no modifica en gran medida el comportamiento eléctrico-térmico del agente de calentamiento, al menos en el orden de magnitud estudiado, doble anchura. La malla con

24 hilos mostró un comportamiento similar a la malla M24 con 12 hilos, sin embargo, la característica meseta relacionada con la T_g del PEI y el punto de inflexión relacionado con el punto de fusión del PPS no quedó definida tan claramente como en el caso de la malla con 12 hilos (ver figuras 3.16 y 3.17). Los perfiles de resistencia versus temperatura mostrados por la malla M24 aislada eléctricamente con pintura siguieron el mismo patrón que la malla sin tratar. Se observó una meseta durante el primer calentamiento que puede ser atribuida a la temperatura de transición vítrea del polímero. No obstante esta región constante de resistencia apareció a temperaturas mayores que en los experimentos de referencia. Este hecho puede ser explicado por la disminución de la abertura de la malla metálica debido al tratamiento con pintura, lo cual hace necesario disminuir la viscosidad del polímero para que sea capaz de cruzar el inserto metálico (ver figura 3.18). Por último, en los experimentos llevados a cabo con el agente de calentamiento previamente impregnado en polímero no se puede observar una clara meseta durante el primer calentamiento. A la vista de las gráficas (ver figuras 3.19 y 3.20) parece que la intercara de la soldadura presenta un comportamiento más lineal que en los casos en los que se utilizan láminas de polímero adicionales a modo de aporte de resina extra.

A continuación se resumen los resultados de los experimentos realizados con el principal objetivo de buscar razones que explicasen el diferente comportamiento de las mallas metálicas durante el primero y subsiguientes calentamientos, especialmente se trató de encontrar una explicación para la relación no lineal entre la resistencia eléctrica y la temperatura mostrada por la malla M24 durante el primer calentamiento.

En un principio se pensó que las mesetas mostradas por la malla M24 durante el primer calentamiento en el perfil de resistencia versus temperatura podían ser debidas a cambios en la longitud del elemento resistivo. Durante el primer calentamiento, el polímero de ambos paneles a soldar fluye a través de la malla metálica pudiendo disminuir el número de conexiones entre hilos longitudinales y transversales, lo que resultaría en un cambio en la longitud efectiva del implante resistivo. Dos factores tienen una influencia en la resistencia eléctrica del agente de calentamiento: la resistividad y la

geometría de la malla. La resistividad está gobernada por la movilidad de los electrones la cual disminuye con la temperatura y por tanto hace aumentar la resistencia eléctrica de dicho elemento. Por otro lado, la longitud real de la malla podría disminuir a medida que se aíslan eléctricamente los hilos de ambas direcciones lo que se traduciría en una disminución de la resistencia eléctrica de la malla. Estos dos efectos podrían estar compensados resultando en una región de resistencia constante. Esta hipótesis queda anulada con los resultados del experimento realizado con una malla metálica de tipo M24 a la que se retiraron los hilos transversales. En la gráfica (ver figura 3.20) se aprecia un comportamiento similar a los mostrados en anteriores experimentos por lo que se descarta un cambio en las conexiones eléctricas de la malla metálica debido a un aislamiento de los hilos de ambas direcciones provocado por el polímero.

Se realizaron cuatro experimentos análogos a los tests 001-004 con la diferencia del valor de presión de consolidación aplicada, en este caso se eligió un valor de 6bar en vez de 3bar. Se puede extraer de los resultados obtenidos y presentados en las figuras 3.22, 3.23, 3.24 y 3.25 que el valor de la presión de consolidación aplicada a los laminados no influye significativamente en el comportamiento de las mallas metálicas. Las curvas generadas en los calentamientos realizados bajo una presión de 6bar siguen un patrón similar a las curvas obtenidas en los experimentos realizados con una presión de consolidación de 3bar.

Una vez que los laminados están soldados, los cambios que tienen lugar en la intercara de la unión durante los siguientes calentamientos no son tan significativos como los ocurridos durante el primer calentamiento (las curvas generadas en el segundo y tercer calentamientos de las muestras se solapan la mayoría de las veces). Para extremar las variaciones en las condiciones de contorno durante el primer calentamiento con el objetivo de observar cambios en el comportamiento eléctrico-térmico de la malla metálica que pudiesen ser atribuidos a la presión, se realizaron ensayos con una presión de consolidación escalonada durante el primer calentamiento. En este caso se observaron cambios en la evolución de la resistencia con la temperatura en la intercara de la soldadura directamente relacionados con la variación brusca de la presión de

consolidación. Al retirar los cilindros que aplican la presión de consolidación, la resistencia eléctrica del agente de calentamiento aumenta. Por el contrario, si se comienza efectuando el calentamiento a presión atmosférica y se aplica repentinamente una presión de consolidación, la resistencia eléctrica de las mallas sufre una significativa disminución.

Cuando se retiran los cilindros neumáticos y se elimina la presión, las partes a soldar se separan levemente introduciéndose aire en la intercara de la unión. La transferencia de calor por convección de la malla metálica al aire en contraposición con la transferencia de calor por conducción que ocurre en los laminados hace que se alcancen temperaturas mayores en la malla metálica cuando el calentamiento se realiza sin presión. Esto se traduce en un incremento de la resistencia eléctrica de la malla metálica. Además, en estos experimentos (ver figuras 3.26 y 3.27), se observa la ya familiar meseta relacionada con la temperatura de transición vítrea del polímero de los laminados y típica del primer calentamiento en calentamientos realizados bajo presión y consecutivos a un calentamiento aplicado sin presión de consolidación. La micrografía de un laminado soldado sin presión de consolidación (ver figura 3.28) muestra una intercara en la que se aprecia gran cantidad de aire atrapado.

Este hecho sugiere que las regiones de resistencia constante observadas en la evolución eléctrico-térmica de la malla metálica son debidas a la variación de la cantidad de aire contenida en la intercara de la unión, ya que el patrón del “primer calentamiento” se repite en sucesivos calentamientos cuando existe contacto de la malla con el aire. La variación de la cantidad de aire atrapado en la intercara de soldadura se traduce en una gradual modificación del mecanismo de transferencia de calor durante el primer calentamiento. Las áreas de la malla metálica en contacto con el aire desarrollan mayores temperaturas debido a la peor transferencia de calor por convección desde la malla al aire en oposición al mecanismo de transferencia de calor por conducción que tiene lugar en las áreas de la malla metálica en contacto con el polímero. Estos puntos calientes producen incrementos locales de la resistividad eléctrica del agente de calentamiento y por tanto, un incremento de la resistencia global del mismo. Por lo tanto, el inserto metálico podría ser esquematizado como un conjunto de pequeñas resistencias eléctricas

en serie, cuyas resistividades se modifican durante el primer calentamiento como consecuencia de la variación en las condiciones de contorno.

Al alcanzar la temperatura de transición vítrea, el polímero empieza a fluir expulsando gradualmente el aire de la intercara y homogeneizando así el contorno que rodea el inserto metálico. El número de puntos calientes mencionados anteriormente y relacionados con las zonas del agente de calentamiento directamente en contacto con el aire, disminuye con el tiempo del proceso. Este fenómeno se relaciona con las mesetas observadas en los perfiles de resistencia versus temperatura mostradas por la malla M24 durante el primer calentamiento. La gradual disminución de esos puntos calientes y el incremento de la temperatura debido al efecto Joule resultan en una región casi constante de resistencia en la evolución eléctrico-térmica de la malla metálica. Una vez que los laminados están soldados, la malla está completamente embebida en la matriz y toda ella se encuentra rodeada por el mismo material. Esto resulta en un mecanismo de transferencia de calor homogéneo que da lugar a una evolución lineal de la resistencia con la temperatura del agente de calentamiento. Por la misma razón, las curvas generadas en los primeros calentamientos se acercan o incluso se solapan con las curvas correspondientes a los subsiguientes calentamientos después de superar la meseta asociada a la temperatura de transición vítrea de la matriz del laminado, ya que entonces no hay interacción entre el aire y el inserto metálico.

Se concluye que el aire contenido en la intercara de la soldadura influye el comportamiento eléctrico-térmico del agente de calentamiento. La gradual modificación del mecanismo de transferencia de calor produce una resistividad no homogénea a lo largo de la malla metálica la cual se traduce en un comportamiento no lineal de la resistencia con la temperatura durante el primer calentamiento.

4. Conclusiones y trabajos futuros.

En este trabajo se ha estudiado la relación entre la resistencia eléctrica y la temperatura de dos mallas metálicas utilizadas como agente de calentamiento para el proceso de soldadura por resistencia de materiales compuestos de matriz termoplástica.

Las mallas ensayadas al aire mostraron una relación lineal entre ambas variables en sucesivos calentamientos. Por el contrario se encontró que el orden de los calentamientos aplicados a las mallas colocadas entre las partes a soldar es de gran relevancia, siendo el comportamiento de las mallas durante el primer calentamiento completamente diferente al generado en subsiguientes calentamientos. Se observó que el comportamiento eléctrico-térmico de los agentes de calentamiento está claramente influenciado por la naturaleza del material de los substratos, especialmente en el caso de la malla metálica M24, la que muestra una clara evolución no lineal de la resistencia con la temperatura durante el primer calentamiento.

El distinto comportamiento mostrado por ambas mallas metálicas durante el primer calentamiento de los insertos metálicos puede ser atribuido a una resistividad no homogénea a lo largo de los hilos de las mallas debido a una gradual modificación del mecanismo de transferencia de calor que se traduce en grandes gradientes de temperatura, provocado por diferentes condiciones de contorno a lo largo del agente de calentamiento. Este fenómeno se repite, aunque en menor medida, incluso trabajando con mallas preimpregnadas en resina y mallas aisladas con pintura. En estos casos los gradientes de temperatura están relacionados con el aire localizado en las interfases malla preimpregnada-laminado y malla aislada-laminado. Se concluye entonces que incluso evitando el contacto directo entre el agente de calentamiento y el aire, el cambio en las condiciones de contorno durante el primer calentamiento provoca un comportamiento eléctrico-térmico en los elementos resistivos diferente al mostrado en calentamientos posteriores.

El comportamiento no lineal de la resistencia con la temperatura, más pronunciado en la malla M24 que en la M200, especialmente cuando se trabaja con los insertos metálicos sin impregnación previa de los mismos, hace difícil monitorizar y controlar la temperatura desarrollada en la intercara de la soldadura a través de mediciones de la resistencia eléctrica. Por otro lado, las significativas diferencias obtenidas en los valores de resistencia para muestras idénticas sugieren problemas de repetitividad en las mediciones. Las pendientes obtenidas en la regresión lineal calculada para describir los datos experimentales son del orden de $10^{-04} \Omega/^{\circ}\text{C}$, lo que significa que incrementos muy pequeños en la resistencia eléctrica de las mallas metálicas son traducidos en considerables variaciones de la temperatura. Por consiguiente sería necesaria una gran precisión en los instrumentos de medida de la resistencia eléctrica para asegurar un control adecuado del proceso de soldadura mediante medidas indirectas.

Con el objetivo de utilizar las mediciones de resistencia eléctrica como método indirecto para monitorizar la temperatura de la intercara y controlar así el proceso de soldadura, las futuras investigaciones deberían focalizarse en hallar soluciones para reducir la no linealidad en las curvas. A la vista de los resultados arrojados por los experimentos llevados a cabo en este estudio, se sugiere un estudio en profundidad de las mallas metálicas preimpregnadas, ya que estas parecen ser menos sensibles a los cambios físicos del polímero y muestran una evolución más lineal de la resistencia eléctrica con la temperatura. Sería interesante comprobar además, si una aproximación lineal de la relación entre ambas variables daría lugar a resultados aceptables en un proceso de soldadura a temperatura constante llevado a cabo con una realimentación de los valores de las medidas de resistencia eléctrica del agente de calentamiento.